

## ГОРНЫЕ ЛЫЖИ И ОПТИКА ФРАКТАЛОВ

В. П. САФОНОВ



Среди работ, выполненных в лаборатории физики лазеров, заметное место принадлежит исследованиям оптических свойств металлических наноконструкций с неупорядоченной структурой. Начались эти исследования, как нередко бывает, благодаря общению специалистов из смежных областей. В апреле 1986 г. в Дивногорске проходил семинар по резонансным нелинейным оптическим процессам в газах. На семинаре обсуждались, главным образом, исследования по нелинейному преобразованию излучения и фотоиндуцированным процессам в резонансных условиях. При обсуждении работ по преобразованию излучения в парах металлов и органических красителей возникло впечатление, что в этих исследованиях пройден определенный этап, выявлены, по крайней мере на качественном уровне, предельные возможности данных сред в различных схемах преобразования, изучены процессы, ограничивающие эффективность преобразования в резонансных условиях.

В перерыве между утренним и вечерним заседаниями участники семинара катались на горных лыжах. При возвращении с горы В.М.Шалаев, один из теоретиков, занимавшихся в Институте физики им. Л.В.Киренского СО АН СССР преобразованием излучения в газовых средах, спросил М.И. Штокмана, сотрудника лаборатории физики лазеров ИАиЭ СО АН СССР, занимавшегося лазерной

модификацией биомолекул и исследованием процессов агрегации оптическими методами, какие направления исследований в оптике он считает наиболее интересными и перспективными. В ответ М. И. Штокман предложил проанализировать возможность усиления оптических откликов при адсорбции молекул на металлических фрактальных кластерах.

К тому времени был известен эффект гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР) молекулами, адсорбированными на шероховатых металлических поверхностях и коллоидных агрегатах. Одно из объяснений эффекта ГКР состояло в усилении локального электрического поля световой волны на частоте плазмонного резонанса металлической наночастицы. Однако существовавшие теории давали фактор усиления, много меньший наблюдаемого, и не объясняли экспериментальную зависимость фактора усиления от длины волны возбуждения. М. И. Штокман обратил внимание на то, что шероховатые поверхности и коллоидные агрегаты относятся к классу объектов с фрактальной структурой. Фракталы образуются во многих природных процессах, например, при росте кластера в условиях диффузионно-ограниченной агрегации. Число мономеров во фрактальном кластере  $N$  зависит от среднего размера кластера  $R$  как  $N \propto R^D$ , где константа  $D$ , называемая фрактальной размерностью, меньше размерности пространства, в котором происходит агрегация. При  $R \rightarrow \infty$  средняя плотность фрактала стремится к нулю, в то же время вероятность найти частицу вблизи данной велика. Поэтому для фракталов характерны большие флуктуации плотности, а значит и других физических величин, в том числе

локальных электрических полей.

Высказанные соображения легли в основу теории оптических свойств металлических фрактальных кластеров, развитой в статье В.М. Шалаева и М.И. Штокмана, опубликованной в ЖЭТФ в 1987 г. Следует отметить, что физические свойства фрактальных кластеров начали изучаться в конце 1970-х гг., однако их оптические свойства к середине 1980-х гг. были изучены слабо. В.М.Шалаевым и М.И.Штокманом показано, что взаимодействие диполей, наведенных световой волной на мономерах, составляющих фрактал, приводит к формированию коллективных плазмонных мод в агрегате, что, в свою очередь, вызывает уширение спектра поглощения по сравнению со спектром изолированных частиц и сильные флуктуации локальных полей во фрактале. Оценки факторов усиления для процесса комбинационного рассеяния и зависимость фактора усиления от длины волны качественно согласовались с экспериментальными данными. На основе этой теории предсказывалось гигантское увеличение эффективности нелинейно-оптических процессов, для которых коэффициент преобразования зависит от высоких степеней поля.

Данное предсказание получило подтверждение в экспериментах по вырожденному четырехволновому рассеянию в коллоидных растворах серебра, выполненных в лаборатории в том же году (С.Г. Раутиан, В.П. Сафонов, П.А. Чубаков, В.М. Шалаев, М.И. Штокман // Письма в ЖЭТФ, 1988). Оказалось, что эффективность нелинейного рассеяния в агрегированном коллоиде в миллион раз превосходит эффективность рассеяния на мономерах. Вскоре в совместной работе с сотрудниками лаборатории А.К.Попова из Института физики СО АН СССР (С.В. Карпов, А.К. Попов, С.Г.Раутиан, В.П.Сафонов, В.В. Слабко, В.М.Шалаев, М.И.Штокман // Письма в ЖЭТФ, 1988) был обнаружен эффект пространственно- частотно- и поляризационно-селективной фотомодификации коллоидных агрегатов серебра. Эффект состоит в пороговом по энергии локальном изменении структуры агрегата в областях, где локальное поле на лазерной частоте велико. В результате "выжигается" резонансная коллективная мода, ответственная за поглощение на лазерной частоте, в спектре появляется дихроичный провал. В дальнейших исследованиях, проведенных при активном участии Ю.Э.Даниловой, установлено, что размер области модификации уменьшается с ростом длины волны и для ИК-излучения может составлять всего 40 нм (захватывает два мономера). Эффект интере-



М. И. Штокман

сен с точки зрения перспектив оптической записи информации.

В последующие годы оптические свойства коллоидных агрегатов благородных металлов активно исследовались экспериментально и теоретически. В.А. Маркель предложил способ учета высоких мультиполей в рамках модели связанных диполей. Это существенно улучшило согласие теории с экспериментом. Спектры линейного и нелинейного поглощения, нелинейная рефракция, фотомодификация фрактальных агрегатов серебра и золота исследовались с привлечением широкого набора оптических методов (ближнепольная оптическая микроскопия, z-сканирование, дисперсионная и сдвиговая интерферометрия, метод пробного поля), структура нанокластеров изучалась методами электронной и атомно-силовой микроскопии. Активное участие в работе приняли сотрудники ИФП СО РАН В.П.Драчев и С.В. Перминов, часть экспериментов проведена в сотрудничестве с Университетом штата Нью Мехико, в котором несколько лет работал В.М.Шалаев.

Эксперименты по исследованию нелинейных поляризационных эффектов в коллоидах серебра с нано- и пикосекундными импульсами, проведенные в последние годы, поставили в повестку дня вопрос об учете светоиндуцированного движения частиц в агрегате (В.П.Драчев, С.В.Перминов, С.Г.Раутиан, В.П.Сафонов, Э.Н.Халиуллин // ЖЭТФ, 2002). В совместном с американскими коллегами эксперименте обнаружено мультипликативное усиление оптических откликов, обусловленное усилением локального поля во фрактальных агрегатах и накоплением поля в микрорезонаторе, получена низкопороговая лазерная генерация в композите коллоидные агрегаты серебра - молекулы красителя, помещенном в микрополость (W.Kim, V.P.Safonov, V.M.Shalaev, R.L.Armstrong // Phys. Rev. Lett., 1999).

Исследования, начатые в лаборатории физики лазеров 15 лет назад, в настоящее время развиваются, по крайней мере, в четырех университетах США, в которые перебрались многие из российских участников работы. Предприимчивые американские коллеги создали небольшую фирму для развития метода мультипликативного усиления и его применений в микроанализе. Продолжается работа и у нас. В новых реалиях все большая часть этой работы выполняется силами студентов НГУ, которые, набрав опыта, вскоре оказываются далеко от родных берегов.



В.П. Сафонов у экспериментального стенда.